공중 통신 환경에서 하향링크 SDMA 기저대역 Precoder 설계

엄준수, 김현민, 신오순
숭실대학교
jseom@soongsil.ac.kr, {hminplus, osshin}@ssu.ac.kr

Downlink SDMA Baseband Precoder Design in Air-to-Air Communication Environments

Joon-Soo Eom, Gil-Mo Kang, Hyeon Min Kim, Oh-Soon Shin
Soongsil University

요 약

본 논문은 공중 통신 환경에서 UAV간 전송 품질을 향상시킬 수 있는 다중 안테나 기반 SDMA 방식을 고려하고, 빔 스케줄러를 위한 Open-loop 형태의 시스템을 가정하고, AoD 추정을 통한 기저대역 Precoder를 설계한다.

Ⅰ. 서 론

무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)가 통신 분야에서 활발히 이용되고 있다[1]. 본 논문에서는 공중 통신 환경에서 UAV간 전송 품질을 향상시킬 수 있는 다중 안테나 기반 SDMA 방식을 고려하고, 빔 스케줄러를 위한 Open-loop 형태의 시스템을 가정하고, AoD 추정을 통한 기저대역 Precoder를 설계하였다.

Ⅱ. SDMA 기저대역 Precoder 설계

본 논문에서는 한 대의 릴레이 UAV와 N_s대의 사용자 UAV가 존재하며, 동일한 수의 K개의 주파수 자원이 사용된다고 가정한다. 릴레이 UAV와 사용자 UAV의 안테나 구조는 모든 방향으로 방사 가능한 PAA (Planar Arrays Antennas)를 가지며, 각 요소 안테나의 수는 $N_t = M_{ru}N_{ru}$, $N_r = M_{mu}N_{mu}$로 가정한다. 릴레이 UAV에서 N_s대의 사용자 UAV에 전송하는 Discrete-Time 다중 빔 신호 벡터는 $\mathrm{X} = \mathrm{F}_\mathrm{k}\mathrm{s}_\mathrm{k}$로 $\mathrm{F}_\mathrm{k} = \left[\mathrm{f}_{1,\mathrm{k}}, \cdots, \mathrm{f}_{\mathrm{n_s},\mathrm{k}}, \cdots, \mathrm{f}_{\mathrm{N_s},\mathrm{k}}\right]$는 Baseband Precoder의 k번째 주파수 자원의 빔포밍 가중치 행렬($N_t \times N_s$)이다. 여기서 $f_{n_s,k}$는 n_s번째 사용자 UAV에 해당하는 송신 빔포밍 가중치 벡터($N_t \times 1$)이며, 벡터의 요소는 $f_{n_t,n_s,k}$로 구성된다. 기저대역 Precoding 행렬 F_k는 통신 채널 $\mathrm{H}_{n_s,k}$의 SVD인 $\mathrm{H}_{\mathrm{n_s,k}} = \mathrm{U}_{\mathrm{n_s,k}}\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{n_s,k}}\mathrm{V}^*_{\mathrm{n_s,k}}$를 통해 구할 수 있다. 여기서 $\mathrm{U}_{\mathrm{n_s,k}}$는 $N_r \times rank(\mathrm{H}_{\mathrm{n_s,k}})$ Unitary 행렬, $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{n_s,k}}$는 $rank(\mathrm{H}_{n_s,k}) \times rank(\mathrm{H}_{n_s,k})$ Singular Value Diagonal 행렬이며, $\mathrm{V}_{\mathrm{n_s,k}}$는 $N_t \times rank(\mathrm{H}_{n_s,k})$ Unitary 행렬로, n_s번째 UAV로 방사하는 최적의 빔 가중치 벡터는 $\boldsymbol{f}^{op}_{n_s,k} = \boldsymbol{v}^1_{n_s,k}$이다. 여기서 $\boldsymbol{v}^1_{n_s,k}$은 $\mathrm{V}_{\mathrm{n_s,k}}$의 첫 번째 열을 의미한다. 따라서 $\mathrm{F}^{op}_k = \left[\boldsymbol{v}^1_{1,k}, \cdots, \boldsymbol{v}^1_{n_s,k}, \cdots, \boldsymbol{v}^1_{N_s,k}\right]$로 나타낼 수 있다.

하지만 SVD를 이용한 빔포밍 방식은 송신단에서 채널을 알아야 한다는 단점이 존재한다. 이는 수신단에서 Pilot 신호를 통해 추정한 채널의 피드팩이 요구되며, 필연적으로 피드백을 위한 채널 양자화로 인한 오류를 유발한다. 특히 고속의 UAV 특성상 매우 짧은 Coherence 시간 그리고 장거리 통신으로 인한 매우 긴 전파지연시간으로 인해 Closed-loop 형태의 시스템은 UAV 특성과 부합되지 않다. 따라서 Open-loop 형태의 시스템을 가정하고, 전체 채널 $\mathrm{H}_{n_s,k}$가 아닌 MUSIC (Multiple Signal Classification)과 같은 채널의 AoA와 AoD 추정 기법을 통해 알 수 있다고 가정한다. n_s번째 사용자 UAV의 AoD (θ_{AoD,n_s}, ϕ_{AoD,n_s})를 안다고 가정할 때, AoD를 통한 기저대역 Precoding 행렬 F^{AoD}_k은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathrm{F}^{AoD}_k = [A_t(\theta_{AoD,1}, \phi_{AoD,1}), \cdots, A_t(\theta_{AoD,n_s}, \phi_{AoD,n_s}), \cdots, A_t(\theta_{AoD,N_s}, \phi_{AoD,N_s})] \quad (1)$$

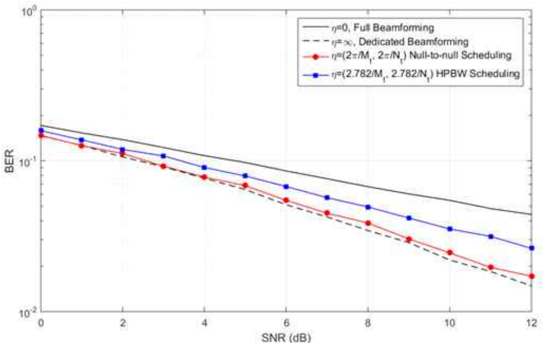

그림 1. 다중 빔 스케줄링 BER 성능 비교(4×4 송신 배열안테나)

따라서 하향링크 시스템의 송신 Throughput R_t는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_t = \log_2\left(1 + \frac{\mathrm{H}_{i,k}\mathrm{f}^{\mathrm{H}}_{i,k}\mathrm{H}^{\mathrm{H}}_{i,k}}{\sum_{j=1, j\neq i}^{N_s} \mathrm{H}_{i,k}\mathrm{f}_{j,k}\mathrm{f}^{\mathrm{H}}_{j,k}\mathrm{H}^{\mathrm{H}}_{i,k}}\right) \quad (2)$$

그림 1은 제안하는 기저대역 Precoder를 사용하며 [2]에서 제안하는 빔 스케줄러를 사용하는 4×4 송신안테나와, 1×1 수신안테나를 가진 하향링크 멀티 빔 SDMA 시스템의 수신 SNR에 따른 BPSK BER 성능을 나타낸 것이다. 4대의 사용자 UAV가 존재하고 같은 수의 주파수 자원이 존재한다. $\eta=0$일 때 즉 스케줄링 없이 Full 빔포밍 하는 경우는 인접 빔간 간섭 영향으로 BER 성능이 악화됨을 확인할 수 있다. 위 그림을 통해 기저대역 Precoder을 설계하고 [2]의 빔 스케줄러를 이용함으로써 Full 빔포밍을 하는 경우보다 BER 성능 향상이 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2C1084834, No. 2017R1A5A1015596).

참 고 문 헌

[1] M. M. Azari et al., "Evolution of Non-Terrestrial Networks from 5G to 6G: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022.

[2] 엄준수, 김현민, 신오순.(2022).공중 통신 환경에서 하향링크 SDMA 빔 스케쥴러 설계.한국통신학회 학술대회논문집, 303-304.